中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1521−1528

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160433

陕 A 群、陕 B 群选育的玉米自交系氮效率评价*

李亚楠 刘雪艳 师亚琴 李艺博 王亚辉 陈朋飞
刘建超 张仁和 徐淑兔 薛吉全**

(西北农林科技大学农学院/农业部西北旱区玉米生物学与遗传育种重点实验室/陕西省玉米工程技术研究中心 杨凌 712100)

摘 要 为阐明不同类型玉米自交系氮效率差异特征，筛选氮高效的玉米自交系，以陕 A 群、陕 B 群选育的 33 份玉米自交系为材料，以 4 份骨干自交系(‘郑 58’、‘昌 7-2’、‘PH6WC’和‘PH4CV’)为对照，调查了 2 种施肥条件下[0 kg(N)·hm^{-2}、180 kg(N)·hm^{-2}]玉米自交系的穗位叶 SPAD 值、叶面积、干物质积累量、叶片、茎秆和籽粒氮含量等生理指标。利用主成分分析和模糊隶属函数，采用逐步回归分析方法建立最优回归方程，筛选耐低氮性综合评价指标。结果表明：穗位叶 SPAD 值、吐丝期绿叶面积、吐丝期茎干重、吐丝期叶干重和籽粒氮含量，可作为玉米自交系耐低氮能力的第 2 性状筛选指标。以产量作为第 1 性状指标，可将 37 份玉米自交系划分为 14 份高产氮高效型，5 份低产氮高效型，15 份低产氮低效型和 3 份高产氮低效型。以耐低氮能力综合值 *D* 值筛选，将 37 份玉米自交系可分成 3 种类型，其中耐低氮能力较强的 15 份(*D* 值≥0.5)，耐低氮能力中等的 15 份(0.35≤*D* 值<0.5)，耐低氮能力较差的 7 份(*D* 值<0.35)。综合分析，2 种施氮条件下，‘KB215’、‘KB417’、‘KA225’、‘KB081’和‘L123098-2’ 5 份玉米自交系具有吐丝期绿叶面积大，吐丝期茎叶干重、籽粒氮含量高和籽粒产量高，耐低氮能力强的特点。因此，强化育种环境的选择压力，实施低氮选择策略，可有效提高玉米种质对氮肥的利用效率。

关键词 玉米 自交系 氮效率 主成分分析 隶属函数
中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1521-08

Evaluation of nitrogen efficiency for selected Shaan A and B maize inbred lines*

LI Yanan, LIU Xueyan, SHI Yaqin, LI Yibo, WANG Yahui, CHEN Pengfei,
LIU Jianchao, ZHANG Renhe, XU Shutu, XUE Jiquan**

(Key Laboratory of Biological and Genetic Improvement of Maize in Arid Northwest Region, Ministry of Agriculture / Corn Engineering Technology Research Center / College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract This study was set up to explore the characteristics of nitrogen (N) use efficiency (NUE) of different groups (Shaan A group and Shann B group) of maize inbred lines, and to screen high N-efficient maize inbred lines. A total of 33 maize inbred lines from the Shaan B and Shaan A groups were used along with 4 elite inbred lines (‘zheng58’, ‘chang7-2’, ‘PH6WC’, ‘PH4CV’) as the control. The study analyzed SPAD value, green leaf area, dry matter accumulation as well as N uptake in stem, leaf and grain of maize inbred lines under no nitrogen [N0, 0 kg(N)·hm^{-2}] and normal N [N180, 180 kg(N)·hm^{-2}] levels. Based on principal component analysis (PCA), fuzzy membership function (FRF), stepwise regression analysis and the optimal regression equation, evaluation indexes for low N tolerance of maize inbred lines was established. The results indicated that SPAD value, green leaf area, stem dry weight and leaf dry weight at silking and grain N uptake were reliable secondary indicators for comprehensive evaluation of low N resistant ability of maize inbred lines. Using yield as primary index, among

* 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDNY01-01-01)资助
** 通讯作者：薛吉全，主要从事玉米育种研究。E-mail: xjq2934@163.com
李亚楠，主要从事玉米育种研究。E-mail: 18291949241@163.com
收稿日期: 2016−05−11 接受日期: 2016−07−25

* Funded by the Innovation Project of Science and Technology of Shaanxi Province (2015KTZDNY01-01-01)
** Corresponding author, E-mail: xjq2934@163.com
Received May 11, 2016; accepted Jul. 25, 2016

37 maize inbred lines, 15 lines were determined as high yield with high N efficiency, 5 lines as low yields with high N efficiency, 15 lines as low yields with low N efficiency and 2 lines as high yields with low N efficiency. According to the integrated value of low N resistance (*D*) calculated using the secondary indexes, 37 maize inbred lines were also divided into three types — 15 lines of strongest resistance to low N with $D \geqslant 0.5$, 15 lines of stronger resistance to low N with $0.35 \leqslant D < 0.5$, and 7 lines of poor resistant to low N with $D < 0.35$. Comprehensive analysis of two N levels showed that 'KB215', 'KB417', 'KA225', 'KB081' and 'L123098-2' had higher green area and stem and leaf dry matter at silking stage, greater grain N content and higher yield, and the strongest resistance to low N. Thus strengthening selection process of breeding environment and low N use effectively improved the utilization efficiency of N fertilizer of maize germplasm.
Keywords Maize; Inbred line; Nitrogen efficiency; Principal component analysis; Membership function

氮素作为植物生长所必需的大量元素，对植物生长发育十分重要。我国已成为世界最大的氮肥生产国和使用国，2012 年消费量占世界的 1/3[1]，且氮肥利用率仅有 30%~40%，远低于 50%的世界水平[2]。氮素过量施用导致玉米(*Zea mays*)生产成本增加、环境污染加剧[3]和氮肥利用率降低。因此，降低氮肥的使用量、提高氮肥利用率成为关注的重点。研究表明，不同玉米品种间氮肥利用效率存在明显差异[4–5]。Duvick[6]认为美国玉米产量提高的主要原因是增强了品种抵抗环境胁迫的能力，一定意义上产量就是抗逆性。玉米产量的改良归功于其忍耐胁迫能力的改善和提高[7]。玉米杂交种的抗逆性来源于亲本自交系的抗逆性[8]。因此，进行玉米种质氮效率基因型差异上的评价，挖掘玉米氮高效种质资源，进而培育玉米氮高效品种是提高氮素利用率的有效途径。

前人应用多种评价指标进行了不同氮效率类型的划分。刘建安等[9]以氮效率和氮响应度为指标将不同氮效率品种划分为 4 种类型：双高效型、低氮高效型、高氮高效型、双低效型。张兴华等[10]以千粒重、穗长和穗粒数为指标对 30 个玉米品种的耐低氮能力进行分析，筛选出'郑单 958'、'陕单 8815'、'京科 28'等较耐低氮品种。崔文芳等[11]利用高氮下产量及耐低氮胁迫指数将自交系材料分为 4 种类型，双高效型、高产氮低效型、低产氮高效型、低产氮低效型。王晓慧等[12]以粒重和氮素籽粒生产效率为指标进行不同氮效率类型的划分。

本课题组以增加适应性为主线，构建了陕 A 群、陕 B 群 2 个杂种优势群，通过多地点、高密度、少施肥和少灌水的技术路线选育了 KA 和 KB 系列玉米自交系。本文以选育的 33 份玉米自交系为材料，以 4 份骨干自交系为对照，结合各种形态生理指标进行不同基因型玉米自交系氮效率的评价分析，阐明不同类型玉米自交系氮效率差异的生理基础，选择可靠的指标并筛选出氮高效的玉米自交系，为进一步优化升级陕 A 群、陕 B 群杂种优势群，开展氮高效玉米育种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以陕 A 群、陕 B 群选育的 33 份玉米自交系为材料，以 4 份骨干玉米自交系('郑 58'、'昌 7-2'、'PH6WC'和'PH4CV')为对照。33 份玉米自交系来源于西北农林科技大学构建的陕 A 群、陕 B 群 2 个杂种优势群体，简化杂优模式，强化逆境人工选择，通过实施多地点、高密度、少施肥和少灌水的技术路线，2009—2013 年开展 5 轮的 30 点联合改良。以单穗粒重(>100 g)、出籽率(>87%)和穗行果穗入选数(>3 个)为指标，经陕西、海南(每年 2 代)连续自交选育而成。材料的具体来源见表 1。

1.2 试验设计

本试验于 2014 年和 2015 年在西北农林科技大学杨凌玉米试验基地(34º54′N, 108º7′E)进行。试验地为壤土，从 2003 年开始进行低氮胁迫，地力均匀一致。0~20 cm 土层含有机质 10.2 $g \cdot kg^{-1}$，全氮 1.06 $g \cdot kg^{-1}$，碱解氮 35.4 $mg \cdot kg^{-1}$，速效磷 14.27 $mg \cdot kg^{-1}$，速效钾 151.4 $mg \cdot kg^{-1}$。

试验施氮水平设置 2 个处理：0 $kg \cdot hm^{-2}$(低氮，N0)、180 $kg \cdot hm^{-2}$(正常氮，N180)。采取裂区设计小区，以氮肥处理为主区，材料为副区，3 次重复。每个自交系种植 2 行，行长 5 m，行距 60 cm，小区面积 6 m^2，种植密度 60 000 株$\cdot hm^{-2}$。40%氮肥作为底肥，60%氮肥在 7 叶展时作为追肥追施。其他管理措施同一般大田。

1.3 测定项目与方法

在拔节期(7 叶展)选择生长一致的 10 株玉米植株挂牌标记叶龄和植株，按照生育进程进行调查。

在吐丝期选择天气晴朗的上午 9:00—10:00，用 SPDA-502plus 测定每份材料穗位叶叶绿素含量，每份测量 10 株，取平均值。于吐丝期测量 5 株绿叶面积，叶面积=叶长×叶宽×0.75。

吐丝期和成熟期，选取有代表性的自交系 3 株，调查干物质积累量，分成茎、叶、苞叶、穗轴和籽

表 1　供试玉米自交系编号及来源

Table 1　Codes of the tested corn inbred lines and their origins

编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin
1	KA008	A 群 A group	20	KB417	B 群 B group
2	KA666-1	A 群 A group	21	KB215	B 群 B group
3	KA101	A 群 A group	22	KB107	B 群 B group
4	KA064	A 群 A group	23	KB020	B 群 B group
5	KA105	A 群 A group	24	L123094-4	B 群 B group
6	KA103	A 群 A group	25	L123098-2	B 群 B group
7	KA203	A 群 A group	26	2013KB-37	B 群 B group
8	L123084-4	A 群 A group	27	2013KB-47	B 群 B group
9	2013KA-34	A 群 A group	28	KB043	B 群 B group
10	2014YLKA-58	A 群 A group	29	KB204	B 群 B group
11	KA227	A 群 A group	30	KB280	B 群 B group
12	KA059	A 群 A group	31	2013HXB1-4	B 群 B group
13	KA225	A 群 A group	32	KB106	B 群 B group
14	2013XCA1-1	A 群 A group	33	2014KB-54	B 群 B group
15	2013YLD3A1-5	A 群 A group	34	郑 58 Zheng 58	对照 Control
16	2014KA-60	A 群 A group	35	昌 7-2 Chang 7-2	对照 Control
17	KB081	B 群 B group	36	PH6WC	对照 Control
18	KB080	B 群 B group	37	PH4CV	对照 Control
19	2011KB-14	B 群 B group			

粒，在105 ℃杀青30 min，80 ℃烘至恒重，计算干物质重。烘干后的样品粉碎后，取0.5 g用Kjeltec 8200全自动凯氏定氮仪测定各器官的氮含量。

收获期收获小区全部果穗进行称重计产，用PM-8188 测定玉米籽粒含水量，按照标准含水量14%计算产量。

1.4　数据处理

耐低氮指数=(低氮水平下测定值/正常水平下测定值)×100%　(1)

参照胡标林等[13]的方法进行隶属函数、主成分权重及耐低氮性综合值分析。

玉米自交系的隶属函数值计算公式：

$$\mu(x_i)=(x_i-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min})\ (i=1, 2, 3, \cdots, n) \quad (2)$$

式中：$\mu(x_i)$为玉米自交系第i个主成分的隶属函数值，x_i为各材料某一主成分得分值，$x_{i\max}$、$x_{i\min}$分别为所有玉米自交系中第i个主成分的最大值和最小值。

各主成分的权重(W_i)计算公式为：

$$W_i=P_i/\sum_{i=1}^{n}P_i \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n) \quad (3)$$

式中：W_i为第i个主成分在所有主成分中的重要程度；P_i为玉米自交系第i个主成分贡献率。

玉米自交系的耐低氮能力综合值(D)计算公式为：

$$D=\sum_{i=1}^{n}[\mu(x_i)\cdot W_i] \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n) \quad (4)$$

采用Microsoft Excel 2007进行数据整理并计算各性状的平均值，Origin 9.0软件作图。SPASS 20.0软件进行统计分析，相关系数、主成分分析和逐步回归分析。

2　结果与分析

2.1　不同施氮水平对玉米自交系产量的影响

从图 1 可以看出，不同施氮水平下各玉米自交系的产量存在较大差异，以所有玉米自交系在 2 种施氮条件下的产量平均值为纵横坐标轴，可将玉米自交系分为 4 种类型，2 种施肥水平下玉米自交系产量均高于平均值的‘KB081’、‘KA225’、‘KB215’、

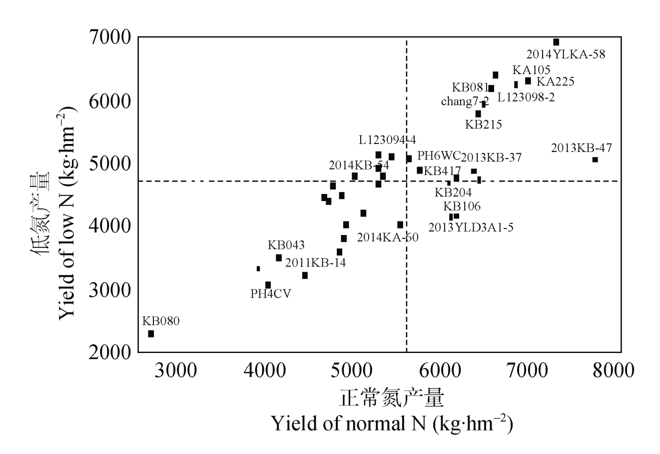


图 1　不同施氮水平玉米自交系产量表现

Fig. 1　The yield performance of maize inbred lines under different nitrogen levels

‘KB417’等14份玉米自交系，处于第1象限，属于高产氮高效型；低氮条件下高于平均值的‘L123094-4’、‘2014KB-54’等5份玉米自交系，处于第2象限，属于低产氮高效型；2种施肥水平玉米自交系产量均低于平均值的‘KB080’、‘2011KB-14’、‘2014KA-60’等15份玉米自交系，处于第3象限，属于低产氮低效型；正常氮条件下高于平均值的‘KB106’、‘KB204’、‘2013YLD3A1-5’共3份玉米自交系，处于第4象限，属于高产氮低效型。

2.2　不同施氮水平对玉米自交系生理指标的影响

SPAD值、叶面积、干物质积累量和氮积累量等生理指标，在处理间和自交系间的方差均达到显著、极显著水平(表 2)，不同施氮水平下各性状的变异系数除绿叶面积外，其他各性状均大于15%，表明自交系间差异较大，有利于对玉米自交系的性状进行评价和筛选。

表 2　不同施氮水平下玉米自交系各性状的均值、变异系数及方差分析

Table 2　The averages, variation coefficients and variance analysis about various characters of maize inbred lines under different nitrogen levels

性状 Trait	N0		N180		*F* 值 *F* value	
	均值 Mean	变异系数 CV (%)	均值 Mean	变异系数 CV (%)	施氮量 N application	自交系 Inbred lines
SPAD (X_1)	49.84	15.18	53.37	15.04	8.85**	3.66**
吐丝期绿叶面积 Green leaf area at silking (X_2, cm^2)	4 197.13	12.42	4 393.16	11.34	16.33**	10.94**
吐丝期茎干重 Stem dry weight at silking (X_3, g·plant^{-1})	40.11	23.77	43.85	20.75	12.11**	7.12**
吐丝期叶干重 Leaf dry weight at silking (X_4, g·plant^{-1})	23.44	19.35	25.41	22.19	9.38**	5.84**
吐丝期干重 Plant dry weight at silking (X_5, g·plant^{-1})	72.67	20.80	80.75	18.75	19.84**	6.51**
花后干物质积累量 Post-silking dry matter accumulation (X_6, g·plant^{-1})	92.82	37.06	113.23	30.52	27.36**	7.44**
吐丝期叶氮含量 Leaf N content at silking (X_7, g·plant^{-1})	0.51	21.35	0.68	24.60	35.46**	1.84*
吐丝期氮含量 N content at silking (X_8, g·plant^{-1})	0.91	25.70	1.33	19.94	71.10**	1.76*
花后氮积累量 Post-silking N uptake (X_9, g·plant^{-1})	0.99	48.86	1.28	37.82	12.93**	3.14**
籽粒氮含量 N uptake in grain (X_{10}, g·plant^{-1})	1.22	33.33	1.49	30.76	12.24**	2.39**

N0：低氮，施氮量为 0 kg·hm^{-2}；N180：正常氮，施氮量为 180 kg·hm^{-2}；*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。N0: low N supply; N180: normal N supply with N application rate of 180 kg·hm^{-2}. * and ** denote significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

以正常施氮水平下的性状值为横坐标，低氮水平下的性状值为纵坐标，以它们的均值为中心线进行分析(图2)，依据不同性状均值可将玉米自交系分成4种类型。综合分析，‘2013KB-47’、‘2013XCA1-1’、‘KB081’、‘2014YLKA-58’、‘PH6WC’等5份玉米自交系在穗位叶SPAD值、吐丝期绿叶面积、吐丝期茎干重、吐丝期叶干重、花后干物质积累量和籽粒氮含量等指标中出现的频率较高，表现为2种施氮条件下均高于平均值，处于第1象限，为高氮高效型；而‘KB043’、‘KB204’、‘2013KA-34’、‘KB106’、‘PH4CV’等5份玉米自交系在各性状的第3象限出现的频率较高，表现为2种施氮条件下均低于平均值，为低氮低效型。

2.3　玉米自交系氮效率相关性状的主成分分析

由于各性状相对值间存在着或大或小的相关性，从而影响到耐低氮性的评价。为了消除不同基因型间遗传学特性的差异，采用性状相对值(耐低氮指数)进行耐低氮性综合评价。从表3相关性分析可以看出，6对性状相对值达极显著相关(P<0.01)，5对性状相对值达显著相关(P<0.05)，其中除吐丝期氮总含量与花后氮积累量达显著负相关(−0.366)外，吐丝期茎干重与吐丝期叶干重、吐丝期叶氮含量和籽粒氮含量、吐丝期叶干重与吐丝期总干重、吐丝期叶氮含量和籽粒氮含量、花后干物质积累量与花后氮积累量和籽粒氮含量、吐丝期叶氮含量与吐丝期氮总含量、花后氮积累量与籽粒氮含量均呈显著正相关，其相关系数为0.331~0.512。表明所有表型性状相对值间均存在不同程度的相关，有些性状相对值间呈显著相关，使得它们提供的信息发生重叠。

为了消除影响，对10个性状的相对值进行主成分分析，综合评价不同自交系间的耐低氮能力。由表4得知，前4个主成分的累积贡献率为72.288%，表明这4个主成分代表了各性状72.288%的信息量。而主成分矩阵反映了各性状对此主成分负荷相对大小和作用的方向，即其对主成分的影响程度。根据前4个主成分向量特征值荷载来解释其实际意义：第1主成分的贡献率为22.780%，花后干物质积累量、花后氮积累量和籽粒氮含量的相对值特征量大于其他

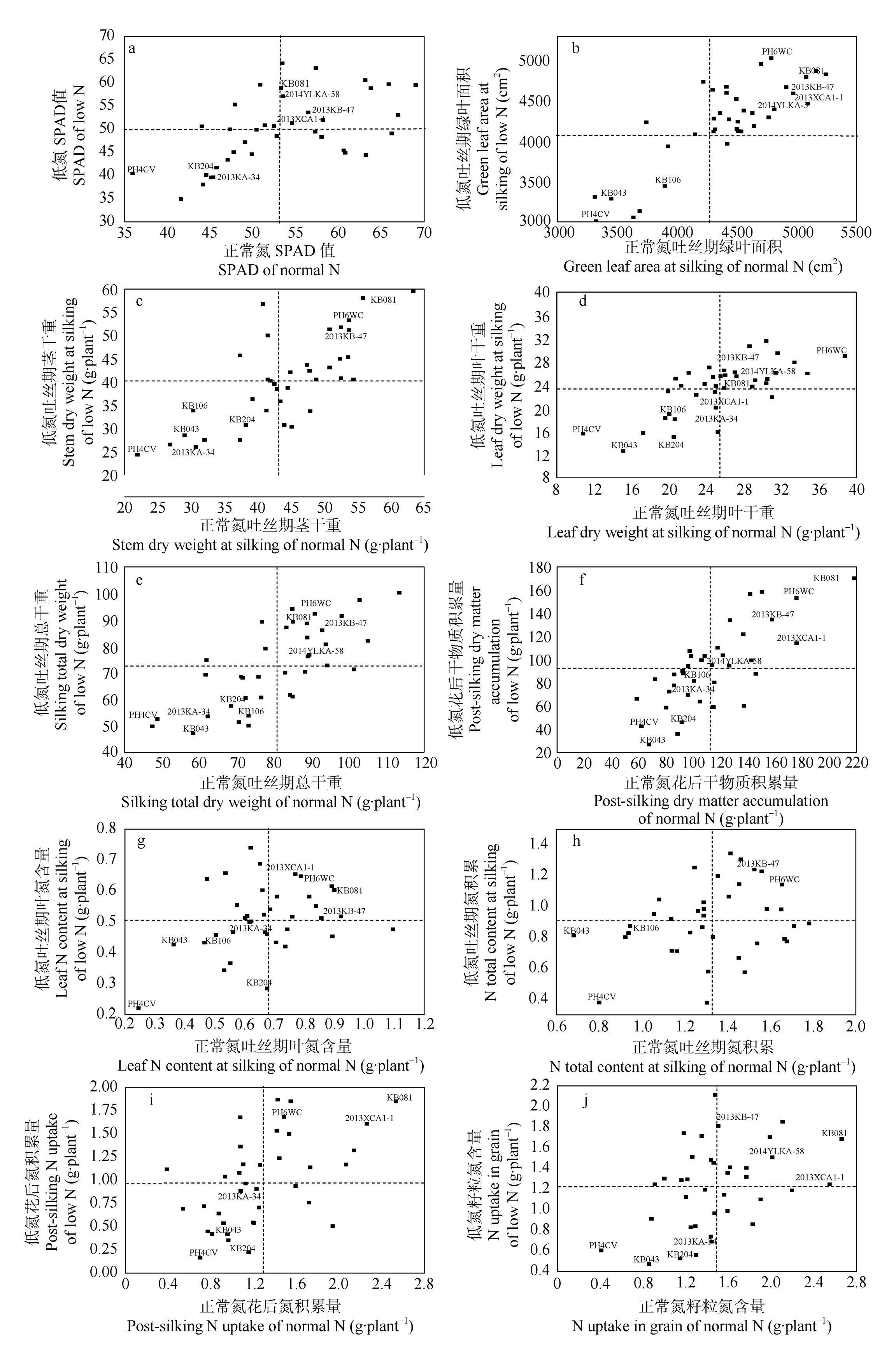


图 2 正常施氮和低氮水平下不同玉米材料的 SPAD 值(a)、吐丝期绿叶面积(b)、吐丝期茎干重(c)、吐丝期叶干重(d)、吐丝期干重(e)、花后干物质积累量(f)、吐丝期叶氮含量(g)、吐丝期氮积累量(h)、花后氮积累量(i)、籽粒氮含量(j)

Fig. 2 Values of SPAD (a), green leaf area at silking (b), stem dry weight at silking (c), leaf dry weight at silking (d), plant dry weight at silking (e), post-silking dry matter accumulation (f), leaf N content at silking (g), N content at silking (h), post-silking N uptake (i), N uptake of grain (j) of different maize inbred lines under normal N and low N supply

表 3 10 个玉米自交系表型性状相对值的相关分析

Table 3 Correlation analysis of the relative values of phenotypic traits about maize inbred lines

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_2	0.267								
X_3	0.010	0.046							
X_4	0.176	–0.014	0.381*						
X_5	0.170	–0.135	–0.198	0.437**					
X_6	–0.041	–0.083	0.088	–0.026	–0.309				
X_7	0.143	–0.009	0.444**	0.341*	0.059	–0.008			
X_8	–0.175	–0.228	0.193	0.025	–0.001	–0.108	0.443**		
X_9	–0.010	–0.010	–0.020	–0.147	–0.134	0.600**	–0.057	–0.336*	
X_{10}	0.092	0.027	0.377*	0.331*	0.040	0.471**	0.102	–0.249	0.512**

表 4 10 个玉米自交系表型性状相对值的前 4 个主成分的特征向量、主成分特征值、贡献率及累积贡献率

Table 4 Eigenvector, eigenvalues, contribution rate, and cumulative contribution rate of first four principal components based on the relative values of ten phenotypic traits of maize inbred lines

参数 Parameter	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
特征值 Eigenvalue	2.278	2.114	1.580	1.257
贡献率 Contribution rate (%)	22.780	21.142	15.796	12.517
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	22.780	43.922	59.718	72.288
X_1	0.086	0.228	0.611	0.337
X_2	0.087	–0.042	0.403	0.760
X_3	0.295	0.675	–0.287	0.296
X_4	0.106	0.761	0.336	–0.231
X_5	–0.256	0.329	0.574	–0.584
X_6	0.785	–0.111	–0.277	–0.097
X_7	0.008	0.759	–0.252	0.170
X_8	–0.415	0.425	–0.603	–0.025
X_9	0.810	–0.242	–0.028	–0.154
X_{10}	0.809	–0.300	0.125	–0.146

2.4 不同玉米自交系的氮效率分析

利用上述各性状相对值的4个主成分贡献率计算4个主成分权重系数(0.315, 0.292, 0.219, 0.174), 结合各主成分因子得分计算各自交系耐低氮能力综合值D, 某一玉米自交系的D值越高, 表明该玉米自交系耐低氮性越强。为此, 以D值为标准, 将玉米自交系分为3级: $D\geqslant 0.5$为Ⅰ级, 属于耐低氮能力较强的玉米自交系; $0.35\leqslant D<0.5$为Ⅱ级, 属于耐低氮能力中等的玉米自交系; $D<0.35$为Ⅲ级, 属于耐低氮能力较差的玉米自交系。依次, 可将37份玉米自交系分成3种类型, ‘KB417’、‘L123098-2’、‘2013HXB1-4’、‘KB106’等15份自交系的D值大于0.5, 属于耐低氮能力较强的玉米自交系(表5), 而‘2014KA-60’、‘2013KA-34’、‘KB043’等7份玉米自交系耐低氮能力较差。

利用已求得的耐低氮能力综合值D和表型性状相对值构建最优回归方程, 筛选耐低氮指标。以D值为因变量(y), 10个表型性状相对值为自变量, 通过逐步回归分析构建的最优回归方程为:

表 5 不同玉米自交系的耐低氮能力分类

Table 5 The classification of low nitrogen tolerance ability of different maize inbred lines

自交系 Inbred line	D 值 D value	类型 Type	自交系 Inbred line	D 值 D value	类型 Type	自交系 Inbred line	D 值 D value	类型 Type
KA203	0.553	Ⅰ	KA008	0.449	Ⅱ	2013KA-34	0.329	Ⅲ
KA227	0.566	Ⅰ	KA666-1	0.404	Ⅱ	2014KA-60	0.287	Ⅲ
KA225	0.529	Ⅰ	KA101	0.368	Ⅱ	2013KB-37	0.343	Ⅲ
KB081	0.505	Ⅰ	KA064	0.404	Ⅱ	KB043	0.315	Ⅲ
2011KB-14	0.554	Ⅰ	KA105	0.384	Ⅱ	KB204	0.208	Ⅲ
KB417	0.576	Ⅰ	KA103	0.460	Ⅱ	2014KB-54	0.295	Ⅲ
KB215	0.567	Ⅰ	L123084-4	0.494	Ⅱ	郑 58 Zheng 58	0.345	Ⅲ
KB020	0.506	Ⅰ	2014YLKA-58	0.424	Ⅱ			
L123094-4	0.570	Ⅰ	KA059	0.350	Ⅱ			
L123098-2	0.640	Ⅰ	2013XCA1-1	0.362	Ⅱ			
2013HXB1-4	0.615	Ⅰ	2013YLD3A1-5	0.430	Ⅱ			
KB106	0.579	Ⅰ	KB080	0.360	Ⅱ			
昌 7-2 Chang 7-2	0.581	Ⅰ	KB107	0.472	Ⅱ			
PH6WC	0.582	Ⅰ	2013KB-47	0.458	Ⅱ			
PH4CV	0.764	Ⅰ	KB280	0.409	Ⅱ			

$$y=-0.966+0.358X_1+0.569X_2+0.212X_3+0.197X_4+0.160X_{10} \quad (5)$$

式中：X_1、X_2、X_3、X_4和X_{10}分别为SPAD值、吐丝期绿叶面积、吐丝期茎干重、吐丝期叶干重和籽粒氮含量性对值，方程决定系数R^2为0.977，说明这5个性状可决定总变异的97.7%。F值为132.89，方程显著(P=0.000 1)。由以上回归方程可知，10个性状相对值中，吐丝期SPAD值、吐丝期绿叶面积、吐丝期茎干重、吐丝期叶干重和籽粒氮含量相对值可显著影响玉米自交系耐低氮能力综合值D，可作为玉米自交系耐低氮能力的第2性状筛选指标。

以产量作为第1性状指标，筛选出12份高产氮高效玉米自交系(图1)，结合以耐低氮能力综合值D筛选的12份耐低氮能力较强的玉米自交系(表5)，'KB215'、'KB417'、'KA225'、'KB081'、 'L123098-2'等5份玉米自交系表现为2种施氮条件下产量水平高，吐丝期SPAD值、吐丝期绿叶面积、吐丝期茎叶干重和籽粒氮含量高，具有较强的耐低氮能力。

3　讨论与结论

张兴华等[10]以耐低氮胁迫指数为玉米表型性状的相对值，通过分析不同施氮水平下相关性状的变化，探讨玉米品种耐低氮能力鉴定指标，筛选耐低氮玉米品种。冯云超等[14]以变异系数最大的氮胁迫下性状相对值为指标，通过隶属函数值进行不同类型氮效率玉米品种的筛选。陈范骏等[15]以高氮和低氮下的产量为指标进行不同氮效率玉米自交系的划分，结果表明骨干玉米自交系'PH6WC'和'昌7-2'属于双高效型，'郑58'属于低氮高效型，'PH4CV'属于双低效型。崔文芳[11]利用高氮下产量及耐低氮胁迫指数对自交系的划分结果表明，'郑58'和'PH6WC'属于双高类型，'昌7-2'和'PH4CV'为低产氮高效型。本研究以课题组构建的陕A群、陕B群为基础材料，通过多地点、高密度、低氮和干旱环境下多代自交选育的33份玉米自交系为试验材料，通过2种施氮水平，以第2性状的耐低氮能力综合值D筛选出15份耐低氮能力较强的玉米自交系，与以产量作为第1性状指标筛选结果基本一致，其中对照骨干玉米自交系'昌7-2'、'PH6WC'属于高产氮高效型，'郑58'属于低产氮高效型，'PH4CV'属于低产氮低效型，与陈范骏等[15]的研究结果一致，进一步说明依据耐低氮能力综合值D进行玉米自交系耐低氮能力评价的可靠性。

目前，关于玉米耐低氮指标体系的建立与评估一直是国内外学者研究的热点[16–17]。刘建安等[18]提出将产量性状作为玉米自交系耐低氮筛选指标。低氮对玉米植株的影响是多方面的，单一地以产量作为筛选指标可能会因为环境和气候等因素造成偏差，而综合考虑所有相关性状会增加鉴定、筛选难度，有必要筛选评价耐低氮指标[14]。Lafitte和Edmeades[19]研究认为，在低氮和高氮条件下，穗位叶叶绿素浓度和叶面积、植株高度等可作为改良玉米氮效率的选择指标。崔文芳等[11]研究表明，籽粒吸氮量、吐丝期茎叶总氮可作为氮高效基因型筛选的重要指标。本研究以在施氮处理间和玉米自交系间存在显著性差异的性状为指标进行分析(更有利于玉米自交系间差异的比较)，求得耐低氮综合值D，以D值和10个性状的相对值进行回归分析，得到SPAD值、吐丝期绿叶面积、吐丝期茎干重、吐丝期叶干重和籽粒氮含量对D的影响较大，可作为玉米自交系耐低氮能力的第2性状筛选指标。

在环境适宜的条件下，植株间性状接近，表现都较好，差异不明显。而在逆境条件下，个体间差异扩大，增加了选择效率[20]。要构建对生态环境(光、温、水和CO_2等)、资源供给(水肥等营养)高效的玉米群体，应是一个弱的竞争群体，具有良好的逆境适应性，即对环境和资源供给的适应性，不但在匮乏的环境中能高效利用资源，而且对作物群体中的相邻植株影响较少，植株间资源的竞争小。在现代玉米品种改良中要改进育种选择方式，强化逆境选择，实施低氮选择策略，是提高品种对逆境适应性的重要途径。 通过2种施氮水平的试验，阐明了33份玉米自交系氮效率差异特征，筛选氮高效的玉米自交系，证实了通过低氮胁迫选择氮高效玉米的可行性。本试验仅从玉米籽粒产量和一些相关生理指标进行分析，玉米自交系氮效率受遗传、育种、生理和生态等方面的综合影响，应通过多年多点的系统研究，从不同角度、层次和水平，综合进行评价分析，进一步阐明逆境选择的重要性。

参考文献　References

[1] Good A G, Beatty P H. Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons[J]. PLoS Biology, 2011, 9(8): e1001124

[2] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462

[3] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 13–24

[4] Chen Y L, Xiao C X, Chen X C, et al. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize[J]. Field Crops Research, 2014, 159: 1–9

[5] Chen Y L, Xiao C X, Wu D L, et al. Effects of nitrogen application rate on grain yield and grain nitrogen concentration in two maize hybrids with contrasting nitrogen remobilization efficiency[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 62: 79–89

[6] Duvick D N. What is yield?[C]//Proceedings of Developing Drought and Low N-Tolerant Maize. El Batan, Mexico: CIMMYT, 1996: 332−335

[7] Tollenaar M. Seeking the upper limit of corn production[J]. Batter Crops, 1986: 6–8

[8] 杨晓钦, 张仁和, 薛吉全, 等. 非生物胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系产量性状的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(7): 1325–1329
Yang X Q, Zhang R H, Xue J Q, et al. Effects of abiotic stress on yield traits of maize hybrids and their parental inbred lines[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(7): 1325–1329

[9] 刘建安, 米国华, 张福锁. 不同基因型玉米氮效率差异的比较研究[J]. 农业生物技术学报, 1999, 7: 248–254
Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Difference in nitrogen efficiency among maize genotypes[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 1999, 7: 248–254

[10] 张兴华, 薛吉全, 刘万锋, 等. 不同玉米品种耐低氮能力鉴定与评价[J]. 西北农业学报, 2010, 19(8): 65–68
Zhang X H, Xue J Q, Liu W F, et al. Screening and identification of low nitrogen tolerance in different maize hybrids[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(8): 65–68

[11] 崔文芳, 高聚林, 王志刚, 等. 玉米自交系氮效率基因型差异分析[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 6–12
Cui W F, Gao J L, Wang Z G, et al. Analysis on genotypic difference in nitrogen efficiency of maize inbred lines[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(3): 6–12

[12] 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 等. 我国北方 37 个高产春玉米品种干物质生产及氮素利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 60–68
Wang X H, Cao Y J, Wei W W. Characteristics of dry matter production and nitrogen use efficiency of 37 spring maize hybrids with high-yielding potential north of China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 60–68

[13] 胡标林, 李霞, 万勇, 等. 东乡野生稻 BILs 群体耐低氮性表型性状指标筛选及其综合评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2346–2352
Hu B L, Li X, Wan Y, et al. Index screening and comprehensive evaluation of phenotypic traits of low nitrogen tolerance using BILs population derived from Dongxiang wild rice (*Oryza rufipogon* Griff.)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2346–2352

[14] 冯云超, 余志江, 霍仕平, 等. 37 个玉米品种耐低氮能力潜势分析[J]. 华北农学报, 2014, 29(S1): 310–317
Feng Y C, Yu Z J, Huo S P, et al. Analyse for low nitrogen-tolerance potential of 37 maize varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(S1): 310–317

[15] 陈范骏, 陈新平. 2014 年国家玉米产业技术体系科企学术研讨会论文集[C]. 广州, 2015
Chen F J, Chen X P. Proceedings of the Academic Seminar about Corn Industry Technology System in 2014[C]. Guangzhou, 2015

[16] 王玲敏, 叶优良, 陈范骏, 等. 施氮对不同品种玉米产量、氮效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 529–535
Wang L M, Ye Y L, Chen F J, et al. Effect of nitrogen fertilization on maize yield and nitrogen efficiency of different maize varieties[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 529–535

[17] 黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293–297
Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(3): 293–297

[18] 刘建安, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米杂交种氮效率基因型差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 276–281
Liu J A, Mi G H, Chen F J, et al. Genotype differences on nitrogen use efficiency among maize hybrids[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(3): 276–281

[19] Lafitte H R, Edmeades G O. Association between traits in tropical maize inbred lines and their hybrids under high and low soil nitrogen[J]. Maydica, 1995, 40(3): 259–267

[20] 张铭堂, 张国良, 才卓. 玉米自交系选育的理论基础与实践经验[J]. 玉米科学, 2010, 18(2): 1–4
Zhang M T, Zhang G L, Cai Z. Theoretical foundation and practice experience of breeding for maize inbred lines[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(2): 1–4